

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平9-61770

(43)公開日 平成9年(1997)3月7日

(51)Int.Cl.⁶

G 0 2 F 1/09

識別記号

5 0 5

庁内整理番号

F I

G 0 2 F 1/09

技術表示箇所

5 0 5

審査請求 未請求 請求項の数17 O L (全 12 頁)

(21)出願番号 特願平7-219941

(22)出願日 平成7年(1995)8月29日

(71)出願人 000005223

富士通株式会社

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号

(72)発明者 白▲崎▼ 正孝

神奈川県川崎市中原区上小田中1015番地
富士通株式会社内

(72)発明者 福島 暢洋

神奈川県川崎市中原区上小田中1015番地
富士通株式会社内

(74)代理人 弁理士 大菅 義之 (外1名)

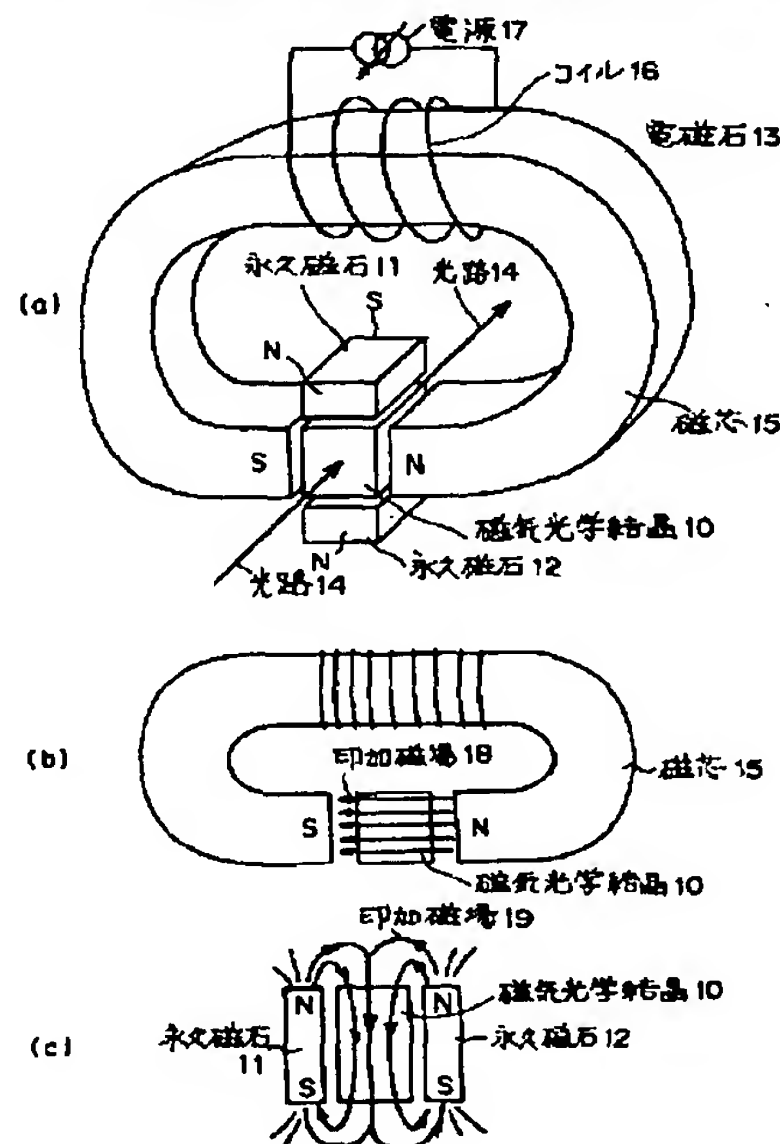
(54)【発明の名称】 ファラデー回転子

(57)【要約】

【課題】 磁気光学結晶に均一な磁場を印加することができ、装置全体の大きさを小さく抑えることができるファラデー回転子を提供する。

【解決手段】 電磁石13は、光路14に対し横方向の磁場を磁気光学結晶10に印加する。永久磁石11、12は、磁気光学結晶10の相対する側面であって磁芯15が設けられていない面に極性を揃えて設けられる。磁芯15のS、N両極の断面は磁気光学結晶10の側面を覆うようにほぼ同形に形成され、磁気光学結晶10に均一な印加磁場18を与える。また永久磁石11、12は同じく磁気光学結晶10の側面に設けられ均一な印加磁場19を磁気光学結晶10に印加する。電磁石13と永久磁石11、12とは光路14を避けて設けることができ、特に永久磁石11、12は電磁石13よりも小さいので2つ設けてもファラデー回転子全体を大型化することはない。

本発明のファラデー回転子の一実施例の構成及び
磁気光学結晶に印加される磁場の様子を示す図



1

【特許請求の範囲】

【請求項1】 入射光のファラデー回転角が可変なファラデー回転子において、前記入射光に対して透明で、磁性を有する磁気光学結晶と、前記入射光の進行方向に平行もしくは交差する第1の方向の磁場を前記磁気光学結晶に印加し、前記入射光の光路を遮らないように配置され、前記磁気光学結晶を磁気飽和させる永久磁石と、前記入射光の前記進行方向に垂直もしくは交差する方向であって前記第1の方向とは異なる第2の方向の磁場を前記磁気光学結晶に印加し、前記入射光の前記光路を遮らないように配置され、磁場の強さ及び方向が可変である電磁石とを備えることを特徴とするファラデー回転子。

【請求項2】 前記永久磁石が前記磁気光学結晶に印加する磁場の方向（前記第1の方向）は、前記入射光の進行方向に対し0度～45度の範囲内にあることを特徴とする請求項1に記載のファラデー回転子。

【請求項3】 前記電磁石が前記磁気光学結晶に印加する磁場の方向（前記第2の方向）は、前記入射光の進行方向に垂直な方向に対し0度～45度の範囲内にあることを特徴とする請求項1または2に記載のファラデー回転子。

【請求項4】 前記永久磁石と前記電磁石とが前記磁気光学結晶に印加する各磁場の方向（前記第1の方向と前記第2の方向）は、互いに直交していることを特徴とする請求項1～3のいずれか1つに記載のファラデー回転子。

【請求項5】 前記永久磁石は少なくとも2つ設けられ、前記磁気光学結晶を中心にして互いに対称な位置に配置されていることを特徴とする請求項1～4のいずれか1つに記載のファラデー回転子。

【請求項6】 前記永久磁石は少なくとも2つ設けられ、前記入射光の前記光路に対して互いに対称な位置に配置されていることを特徴とする請求項1～4のいずれか1つに記載のファラデー回転子。

【請求項7】 前記永久磁石の形状は四角柱状であることを特徴とする請求項1～6のいずれか1つに記載のファラデー回転子。

【請求項8】 前記永久磁石が前記磁気光学結晶に印加する磁場は、前記光路に平行であることを特徴とする請求項1～7のいずれか1つに記載のファラデー回転子。

【請求項9】 前記電磁石が前記磁気光学結晶に印加する磁場は、前記光路に対し垂直であることを特徴とする請求項1～8のいずれか1つに記載のファラデー回転子。

【請求項10】 前記磁気光学結晶の形状は球形であることを特徴とする請求項1～9のいずれか1つに記載のファラデー回転子。

2

【請求項11】 前記磁気光学結晶は、YIGの単結晶であることを特徴とする請求項1～10のいずれか1つに記載のファラデー回転子。

【請求項12】 入射光のファラデー回転角が可変なファラデー回転子を一部に含む光学装置において、前記ファラデー回転子は、前記入射光に対して透明で、磁性を有する磁気光学結晶と、

10 前記入射光の進行方向に平行もしくは交差する第1の方向の磁場を前記磁気光学結晶に印加し、前記入射光の光路を遮らないように配置され、前記磁気光学結晶を磁気飽和させる永久磁石と、前記入射光の前記進行方向に垂直もしくは交差する方向であって前記第1の方向とは異なる第2の方向の磁場を前記磁気光学結晶に印加し、前記入射光の前記光路を遮らないように配置され、磁場の強さ及び方向が可変である電磁石とを備えることを特徴とする光学装置。

20 【請求項13】 入射光のファラデー回転角が可変なファラデー回転子と、該ファラデー回転子によって回転させられた偏光面の回転角に応じて前記入射光の透過強度を変化させる偏光子とを含む光減衰器において、前記ファラデー回転子は、前記入射光に対して透明で、磁性を有する磁気光学結晶と、

30 前記入射光の進行方向に平行もしくは交差する第1の方向の磁場を前記磁気光学結晶に印加し、前記入射光の光路を遮らないように配置され、前記磁気光学結晶を磁気飽和させる永久磁石と、前記入射光の前記進行方向に垂直もしくは交差する方向であって前記第1の方向とは異なる第2の方向の磁場を前記磁気光学結晶に印加し、前記入射光の前記光路を遮らないように配置され、磁場の強さ及び方向が可変である電磁石とを備えることを特徴とする光減衰器。

【請求項14】 入射光のファラデー回転角が可変なファラデー回転子と、該ファラデー回転子によって回転させられた偏光面の回転角に応じて前記入射光の透過強度を変化させる偏光子と、前記ファラデー回転角を時間的に変化させる変調制御手段とを含む光変調器において、前記ファラデー回転子は、

40 前記入射光に対して透明で、磁性を有する磁気光学結晶と、

前記入射光の進行方向に平行もしくは交差する第1の方向の磁場を前記磁気光学結晶に印加し、前記入射光の光路を遮らないように配置され、前記磁気光学結晶を磁気飽和させる永久磁石と、

50 前記入射光の前記進行方向に垂直もしくは交差する方向であって前記第1の方向とは異なる第2の方向の磁場を前記磁気光学結晶に印加し、前記入射光の前記光路を遮らないように配置され、磁場の強さ及び方向が可変である電磁石とを備えることを特徴とする光変調器。

【請求項 15】 入射光のファラデー回転角が可変で、該入射光を第 1 の偏光状態と第 2 の偏光状態とに変換するファラデー回転子と、前記第 1 の偏光状態の光を透過し、前記第 2 の偏光状態の光を遮断する切替え手段とを含む光スイッチにおいて、前記ファラデー回転子は、前記入射光に対して透明で、磁性を有する磁気光学結晶と、

前記入射光の進行方向に平行もしくは交差する第 1 の方向の磁場を前記磁気光学結晶に印加し、前記入射光の光路を遮らないように配置され、前記磁気光学結晶を磁気飽和させる永久磁石と、前記入射光の前記進行方向に垂直もしくは交差する方向であって前記第 1 の方向とは異なる第 2 の方向の磁場を前記磁気光学結晶に印加し、前記入射光の前記光路を遮らないように配置され、磁場の強さ及び方向が可変である電磁石とを備えることを特徴とする光スイッチ。

【請求項 16】 前記切替え手段は前記第 2 の偏光状態の光の進行方向を変えることを特徴とする請求項 15 記載の光スイッチ。

【請求項 17】 入射光のファラデー回転角が可変なファラデー回転子と、該ファラデー回転子からの出力光の偏光状態を検出する偏光モニタ手段と、該偏光モニタ手段によって検出された偏光状態に基づいて前記入射光の偏光面の回転角を制御する制御手段とを備える偏光制御器において、

前記ファラデー回転子は、前記入射光に対して透明で、磁性を有する磁気光学結晶と、

前記入射光の進行方向に平行もしくは交差する第 1 の方向の磁場を前記磁気光学結晶に印加し、前記入射光の光路を遮らないように配置され、前記磁気光学結晶を磁気飽和させる永久磁石と、

前記入射光の前記進行方向に垂直もしくは交差する方向であって前記第 1 の方向とは異なる第 2 の方向の磁場を前記磁気光学結晶に印加し、前記入射光の前記光路を遮らないように配置され、磁場の強さ及び方向が可変である電磁石とを備えることを特徴とする偏光制御器。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、ファラデー回転子に関し、特に、そのファラデー回転角を磁気光学結晶に印加する磁場を変化させることによって制御する方式のファラデー回転子に関する。更には、そのようなファラデー回転子を一部に備えた光減衰器や光変調器の各種光学装置に関する。

【0002】

【従来の技術】ファラデー回転子は、光がその進行方向に平行な磁場の中を通過する際、偏光面が回転するというファラデー効果を利用して光の偏光状態の制御を行う

ための素子である。一般に、ファラデー回転子は、磁化を有する磁気光学結晶とこの磁気光学結晶に磁化を生じさせるための磁場印加手段とからなり、磁化の生じた磁気光学結晶内部を光に通過させることにより、光の偏光面を回転させる。磁気光学結晶を通過したことにより偏光面が回転した角度をファラデー回転角という。

【0003】特に、上記のようなファラデー回転子は、磁場印加手段によって印加される磁場を制御することによって、磁気光学結晶内部に生じる光の進行方向と平行な磁化成分を変化させ、ファラデー回転角を制御できるため、偏光の制御素子として多く利用されている。

【0004】このような素子は、波長板などの偏光変換素子や偏光子などの偏光分離・選択素子と組み合わせることによって、偏光の任意変換素子や光スイッチ、光変調器、光減衰器等さまざまな光学装置を実現することができる。

【0005】図 7 は従来のファラデー回転子の構成図である。同図においては、薄板状の磁気光学結晶 70 に磁場を印加するために永久磁石 71 及び磁芯 73 とコイル 74 とからなる電磁石 72 が設けられている。コイル 74 には、電圧や極性を変えることのできる電源 75 が接続されコイル 74 に電流を供給する。

【0006】永久磁石 71 は光路 76 に対して横方向に磁場を印加し、電磁石 72 は光路 76 に平行な磁場を印加している。電磁石 72 の S 極と N 極は電源 75 の極性を変えることによって、入れ換えることができる。

【0007】また、磁芯 73 には、光路 76 の邪魔にならないように、光通過溝 77 が設けられ、この溝部分を光が通るように構成されている。この構成ではファラデー回転子の磁化不飽和により光の偏光の回転角が不連続に変化することを防ぐために、光の進行方向に平行な磁場を電磁石で変化させるだけではなく、それと横方向に永久磁石による一定磁場を印加している。これによって、磁場の切り換え動作中もファラデー回転子の磁化は飽和している。

【0008】磁化の飽和について図面を用いて説明する。図 8 (a) は磁性体の磁気ヒステリシスループを示す。磁性体に磁場 H をかけると自発磁化が生じる。図 8 (a) は磁場 H の強さを H_m と $-H_m$ との間で往復させた場合の磁化 M の大きさを測定することにより得られるものである。同図の磁気飽和部に示されるように、磁化 M は、磁場 H の強さが所定の大きさになるとそれ以上大きくならなくなり、磁気飽和を起こす。

【0009】磁化 M は、磁場 H の強さが次第に大きくなる場合には、ルート (1) のような経路をたどり、磁場 H の強さが次第に小さくなる場合には、ルート (2) のような経路をたどって変化する。

【0010】図 7 のファラデー回転子において、永久磁石 71 が設けられていないとすると、ファラデー回転角を変化させるためにコイル 74 に流す電流を変化させた

5

場合、磁気光学結晶70内部の磁化は図8(a)のヒステリシスループに示されるように変化する。ところで、磁気光学結晶70内部の磁束密度は磁場と磁化を加え合わせたものであるので、印加する磁場の大きさが同じでも磁気光学結晶70の内部に生じる磁束密度は異なる値を持つことになる。ファラデー回転角は磁気光学結晶70の内部に生じる磁束密度によって決定されるので、同じ強さの磁場を印加していても、異なるファラデー回転角が得られてしまい、制御が難しくなってしまう。

【0011】図8(b)は磁性体内部の磁区を説明する図である。磁性体内部には磁壁80で囲まれた磁区81が存在し、それぞれが独自の強さと方向を持った磁化(同図においては矢印で示されている)を有している。同図の状態の磁性体に磁場を印加した状態が図8(c)である。

【0012】磁性体に印加される磁場の強さが強くなるに従い、それぞれの磁区が有していたさまざまな方向及び強さの磁化は、次第に同じ方向を向こうとする。図8(c)においては、参照番号82~86で示される磁区の磁化の方向が図8(b)と比べると回転しているのが示されている。この磁化の方向の回転は磁気光学結晶全体の磁化の不連続な変化として現れ、磁束密度の大きさを不連続に変化させる。

【0013】印加される磁場の強さが強くなって磁化の方向が揃った磁区81と82~86の間の磁壁は自然に消滅し、1つの大きな磁区になる。更に印加磁場が強くなると次第に磁区81は大きくなっていき、ついには磁性体全体が1つの磁区ようになってしまう。このような状態が磁気飽和の状態である。

【0014】上記したような原因により図8(a)に示されているルート(1)と(2)とでは、ヒステリシスループに凹凸が生じている。このように、磁場Hの強さを連続的に変化させたとしても磁化Mが不連続に変化することによって磁束密度も不連続に変化してしまう。このようなことが起こると、磁気光学結晶中を通過する光のファラデー回転角も不連続に変化してしまう。

【0015】そこで、図7のファラデー回転子では、永久磁石71を設けてやり、電磁石72が加える磁場と永久磁石71とが加える磁場とを合わせた磁場の強さが、磁気光学結晶70を常に磁気飽和させるように構成して

いる。

【0016】磁気飽和状態では、図8(a)に示されるように磁場の強さが変化しても磁化の大きさは一定であるので、磁束密度が不連続に変化することはなく、ファラデー回転角を不連続に変化させることがない。

【0017】ファラデー回転角を変化させる場合は、コイル74に流れる電流を制御して電磁石72の作る磁場の強さを変化させる。電磁石72の作る磁場と永久磁石71の作る磁場がベクトル的に加え合わせられることにより、磁気光学結晶70に印加される磁場の方向が変化

6

させられる。従って、磁化は飽和したまま磁場につられて方向を変えることになり、光路76に平行な磁化成分が変化することになって、ファラデー回転角が変化する。

【0018】

【発明が解決しようとする課題】図9は、従来のファラデー回転子の問題点を説明する図である。図7のファラデー回転子において、電磁石72の磁芯73に光通過溝77が設けられているように、従来のファラデー回転子では、電磁石の磁芯が光の通過路を邪魔しないように配置しなければならなかった。

【0019】図9(a)のように、電磁石72は光路76と平行な磁場を印加するために磁芯73'が磁気光学結晶70の上下に回り込むように設けられている。従って、光路76を遮らないように磁芯73'は磁気光学結晶70の上面及び下面を全部覆うようには配置できない。

【0020】一方、永久磁石71は光路76に垂直な方向の磁場を印加するために磁気光学結晶70の側面を覆うように設けられている。永久磁石71は光路76を避ける必要がないので磁気光学結晶70の側面全面を覆うことができ、磁気光学結晶70に一樣な磁場90を印加することができる。

【0021】図9(b)は、同図(a)を上方から見た図であり、電磁石72の磁芯73'が光路76を避けて設けられているところを示されている。このように、磁気光学結晶70の上面及び下面の一部を光路76のためにあけておくため、磁芯73'を磁気光学結晶70の上面及び下面を全面的に覆うように構成して均一な磁場を印加することができない。

【0022】図9(c)は、電磁石72が磁気光学結晶70に印加する磁場の様子を示す図である。同図に示されているように、磁芯73'は光路76を避けるように設けられているので、電磁石72のN極から出た磁場91は磁気光学結晶70の中に浸透するとともに、大きく迂回して電磁石72のS極に到る。このように磁場91が磁気光学結晶70の中にその磁力線が膨らむ形で浸透するので、磁気光学結晶70の内部に生じる磁束密度も不均一となる。磁気光学結晶70内部の磁束密度が不均一になることはファラデー回転角に悪影響を及ぼし、ファラデー回転角の制御を難しくする。

【0023】電磁石による光路76と平行な方向の磁場を均一なものにしようとする場合には、図7のように、磁芯73に光通過溝77を設けて、できるだけ磁気光学結晶の上面あるいは下面を磁芯73の磁極で覆うようにしなければならない。この場合、電磁石を2つ設けたりすることにより均一な磁場を形成することも考えられるが、電磁石は一般に永久磁石より大きく、ファラデー回転子そのものも大型化してしまう。また、光通過溝77のような構造を設けるのにも手間がかかり、製造コスト

を高くつくという側面を有している。

【0024】このように、従来の磁場印加方法では電磁石の磁芯が光路を避けて設置されるために磁気光学結晶に印加する磁場が均一とならず、また、ファラデー回転子の大型化に伴って、レンズなどの光学系を含めた装置が大型化する傾向にあった。

【0025】従って、本発明の課題は、磁気光学結晶に均一な磁場を印加することができ、しかも装置全体の大きさも小さく抑えることができるファラデー回転子を提供することである。

【0026】

【課題を解決するための手段】本発明では、均一な磁場で効率よく偏光面を制御するために、まず、ファラデー回転子の磁化不飽和を抑えるための永久磁石の磁場方向を光の進行方向に平行もしくは交差する第1の方向とし、永久磁石の本体を光路を遮らないように配置し、電磁石による印加磁場方向を光の進行方向に垂直もしくは交差する方向であって前記第1の方向とは異なる第2の方向とし、磁芯が光路を遮らないように配置する。その結果、永久磁石あるいは電磁石に穴をあけずに永久磁石や電磁石の磁芯（ヨーク）を配置できるため、磁気光学結晶に印加される磁場を均一にできる。

【0027】また、永久磁石を複数個用いて磁気光学結晶に印加する磁場の均一化を図る。永久磁石は電磁石に比べて小さくても強い磁場を作ることが可能なので、複数個設けることにより磁場の均一化を図ったとしてもファラデー回転子が大型化することがない。

【0028】電磁石によって印加される磁場を均一にするために電磁石を複数個設ける必要がないので、ファラデー回転子の大型化を更に抑えることができる。本発明の他の側面においては、磁化を有する磁性体である磁気光学結晶内部の反磁場により磁場が不均一になるのを避けるため、磁気光学結晶自体の形状を球とする。すなわち、磁場の印加方向が変化することによる反磁場の強さの変化を防ぐことができるので、磁気光学結晶に印加される磁場をより均一にすることができる。

【0029】

【発明の実施の形態】図1は、本発明の一実施例の構成及び磁気光学結晶に印加される磁場の様子を説明する図である。

【0030】本実施例においては、磁気光学結晶10の形状は四角柱となっている。ファラデー回転子に使用する磁気光学結晶は特に限定されるものではないが、実用的にはYIG（ $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ；イットリウム・鉄ガーネット）で形成されるものが多い。あるいは、YIGにテルビウム、ビスマス等で置換した（ $\text{Bi}_x\text{Tb}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ）や（ TbHoBi ） $_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 等が使われる。

【0031】本実施例のファラデー回転子は従来のものと同じ構成要素、すなわち永久磁石と電磁石とを有して

いるが、その配置が異なっている。図1（a）に示されるように、電磁石13の磁芯15は磁気光学結晶10の側面に設けられており、光路14に対し横方向の磁場を印加する構成となっている。永久磁石11と12は、同じく磁気光学結晶10の側面に設けられており形状も四角柱となっている。本構成においては、永久磁石11と12は、光路14と平行な方向に磁場を印加するために設けられており、更に、磁気光学結晶10に印加される磁場がより均一となるように、磁気光学結晶10の相対する側面に沿って2個設けられている。

【0032】永久磁石は小型で強力であるので容易に均一な磁場を得ることができるとともに、図1（a）に示されるように配置することにより、光路14の邪魔にならず、2個設けてもファラデー回転子全体の大型化にはつながらない。

【0033】また、電磁石13はコイル16や電源17を有し、磁芯15も大きくなりがちであるが、光路14の横方向に磁場を印加する構成としたことにより、磁芯15を光路14を避けるような形にする必要がなくなった上に、磁気光学結晶10の側面の形状と磁芯15の形状とを同形とすることができるので、電磁石13は1個設けるだけで磁気光学結晶10に均一な磁場を印加することができる。

【0034】すなわち、電磁石13の磁芯15と光路14との位置関係において、電磁石13による磁場を光路14の横方向から印加するようにしたことによって電磁石13の磁芯15を磁気光学結晶10に近接して用いることができ、その結果、駆動電流の低減、印加磁場の均一化などの利点を得ることができる。

【0035】図1（b）は、電磁石13が磁気光学結晶10に印加する磁場の様子を示したものである。同図に示されるように、磁芯15のS極とN極は共に、磁気光学結晶10の側面を全体的に覆うように構成されているので、印加磁場18は、その磁力線がほとんど平行となり均一な磁場となっている。

【0036】一方、図1（c）は、永久磁石が磁気光学結晶に印加する磁場の様子を示すものである。同図に示されるように、永久磁石11と12は、磁気光学結晶10を両側から挟むように設けられている。永久磁石11と12のそれぞれのS極とN極は共に同じ方向を向いており、磁気光学結晶10に一定方向の磁場を印加する構成となっている。図に示されている永久磁石11と12の磁力線はそれぞれの永久磁石11、12のN極から出て、永久磁石11、12の外部を迂回してそれぞれのS極に到る。磁力線はそれぞれのN極からS極に到る途中で磁気光学結晶10を通過しており、その結果、磁気光学結晶10には光路と平行な磁場が印加される。

【0037】永久磁石11、12の側面は、図1（a）に示されるように、磁気光学結晶10と同様な形状に形成されており、その相対する両側面に設けられているの

で、磁気光学結晶10の全体に渡って均一な磁場を印加することができる。

【0038】磁気光学結晶10は、これまでに多く使われている、LPE (Liquid Phase Epitaxial) 法によって成長される結晶である $(\text{GdBi})_3(\text{FeAlGa})_5\text{O}_{12}$ などの材料を用いた場合には、一般的に波長 $1.55\mu\text{m}$ の入射光において偏光面が45度回転するのに要する距離に相当する $300\sim500\mu\text{m}$ の厚さを有し、また入射光線の太さに合わせて1mm四方程度の面積を持った入射面を有するのが標準的である。

【0039】本実施例の磁気光学結晶10の形状としては、例えば、3辺が2mm程度の立方体である。この時の永久磁石11、12の大きさは、 $2\times2\times4\text{mm}$ 程度であり、電磁石15は $8\times10\times4\text{mm}$ 程度となり、永久磁石の方が格段に小さい。従って、従来の構成において均一な磁場を得るために複数の電磁石を使用した場合に比べて、本実施例のような構成はファラデー回転子の大きさを格段に小さくすることができる。

【0040】図2は、電磁石及び永久磁石によって印加される磁場と磁気光学結晶の磁化の関係を示す図である。同図(a)は電磁石による磁場はなく、永久磁石による磁場のみが存在する場合を示す。磁気光学結晶10に印加される磁場は永久磁石によるもののみであり、光路21に平行である。この印加磁場22によって生じる磁化23は同様に光路21に平行であるが、磁化23は永久磁石による印加磁場22のために飽和している。

【0041】この状態の磁気光学結晶10に光路21に沿った光が入射された場合は、ファラデー回転角は最大の大きさとなる。同図(b)は、電磁石による磁場が存在する場合を示す。

【0042】永久磁石による磁場は大きさが一定なので、光路21に平行な磁場の成分は変化しないが、電磁石による磁場が横方向に印加されているため磁気光学結晶10に印加される印加磁場22は、同図に示されるように、これら2つの磁場をベクトルの的に合成したものとなる。

【0043】磁気光学結晶10に生じる磁化23は印加磁場と平行となり、従って光路21に対して傾斜したものとなる。印加磁場22の強さは大きくなるものの、磁気光学結晶10内部の磁化23は永久磁石による磁場によって既に飽和しているため、磁化23自身の大きさは変化しない。

【0044】よって、磁化23はその大きさを変えずに方向だけを印加磁場に平行な方向に変化させる。このことにより、磁化23の光路21に平行な成分は同図(a)の場合よりも小さくなり、ファラデー回転角も同様に小さくなる。

【0045】同図(c)は、電磁石による磁場を同図(b)よりも強くした場合を示す。上記したように、磁気光学結晶10に印加される印加磁場22は大きさが固

定された永久磁石による磁場と電磁石による磁場の合成であり、同図(c)の場合には印加磁場22の大きさが同図(a)及び(b)の場合に比べてもっとも大きくなっている。この印加磁場22が磁気光学結晶10に印加されると、印加磁場22と平行な磁化23が生じる。しかし、磁化23は既に飽和しているため、磁化の大きさは変化しない。これにより、磁化23の光路21に平行な成分は、同図(a)、(b)のいずれの場合よりも小さくなる。従って、ファラデー回転角も前述のいずれの場合よりも小さくなる。

【0046】このように、電磁石によって磁気光学結晶10に印加する磁場の大きさを変化させることにより、ファラデー回転角を制御することができる。例えば、永久磁石の磁場のみが印加された場合のファラデー回転角を 45° と設定すると、ファラデー回転角の制御範囲は $0^\circ\sim45^\circ$ となる。

【0047】図3は図1の実施例の変形例の構成とその作用を説明する図である。同図(a)の構成においては、永久磁石11、12及び電磁石13が、光路14及び磁気光学結晶10に対し垂直な方向から傾斜している。

【0048】このように傾斜することにより、永久磁石11、12及び電磁石13が磁気光学結晶10に印加するそれぞれの磁場は、いずれも光路14とは平行あるいは垂直とはならないが、磁気光学結晶10に印加される磁場は、これらの磁場を合成したものであるため、図1の実施例と同様の作用を有する。

【0049】また、永久磁石11、12及び電磁石13の傾斜方法は同図(a)のような方法に限られることなく、電磁石13と永久磁石11、12とをそれぞれ独立に光路14に対して傾斜させて設置することも可能である。この場合、実用的には、電磁石13が磁気光学結晶10に印加する磁場は、光路に対して垂直な状態から 45° 程度傾いた状態までの任意の角度で設定すればよい。同様に、永久磁石11、12が磁気光学結晶10に印加する磁場は、光路14に平行な状態から 45° 程度傾斜した状態までの任意の角度で設定すればよい。

【0050】ただし、いずれの場合も永久磁石11、12や磁芯15が光路14を遮らないように設けることが必要である。電磁石13や永久磁石11、12が大きく傾斜し、光路14を遮るようになる場合には、磁芯15や永久磁石11、12の形状をかえて光が通るための光路を作る必要がある。しかしながら、このようにそれぞれの形状を変えなくてはならない程に傾斜させると、図7の従来のファラデー回転子のように形成される磁場が均一でなくなってしまうため、ファラデー回転角に影響を及ぼすようになってしまうので好ましくない。

【0051】同図(b)は、同図(a)の構成によって磁気光学結晶に印加される磁場とこの磁場によって生じる磁化の様子を説明する図である。同図(b)の左側に

示されているのは、電磁石 13 と永久磁石 11、12 とによって形成される磁場及びこれらの合成である印加磁場を示している。②で示される矢印は永久磁石 11、12 により形成される磁場であり、電磁石 13 による磁場が存在しない場合には、この磁場が磁気光学結晶 10 への印加磁場となる。電磁石 13 が (1) の矢印で示される磁場を印加している場合には、磁気光学結晶 10 への印加磁場は①のようになる。同様に、電磁石 13 が

(2) で示される磁場を印加している場合には、印加磁場は③のようになる。

【0052】これら①～③の印加磁場に対応して生じる磁化が同図 (b) の右側に示されている。前述したように磁化①～③は、その大きさが同じで方向のみが異なる。これから分かるように、磁化①、②の光路 14 に平行な成分は下向きであるが、磁化③の光路 14 に平行な成分は上向きとなっている。磁化①と②によって生じるファラデー回転は、その光路 14 に平行な成分が共に同じ下向きであるので、回転角の大きさは異なるものの偏光面の回転方向は同じである。一方、光路 14 に平行な成分が磁化①、②とは反対の磁化③によって生じるファラデー回転は、回転方向が磁化①、②による回転方向とは逆になる。

【0053】このように、電磁石 13 や永久磁石 11、12 を光路 14 に対して傾斜して設けることにより、入射光の偏光面の回転方向を逆にすることが可能となる。図 4 は、本発明のファラデー回転子の他の実施例の構成図である。同図においては、図 1 の実施例と同じ構成要素には同じ参照番号を付してある。

【0054】本実施例においては、磁気光学結晶 40 の形状を球形としている。その他の構成は、前述の実施例及び変形例と同様であり、特に、磁芯 15 と永久磁石 11、12 を光路 14 に対して傾斜して設けることは可能であり、その際に得られる作用も同様である。

【0055】前述の実施例及び構成例においては、磁気光学結晶中の磁場の均一性という点では従来の方法に比べて向上しているが、本実施例においては更に、印加する磁場の方向が変化することにより磁気光学結晶 40 内部に生ずる反磁場の変化の影響を抑えるために、磁気光学結晶 40 の形状を球形とする。磁気光学結晶 40 の形状を球形とすると、磁気光学結晶 40 の形状に方向依存性がなくなる。反磁場は、磁性体の形状によりその強さ等を変化させるので、形状を方向依存性のない球形とすることにより、反磁場にも方向依存性がなくなり、全体により均一な磁場を実効的に印加できる。

【0056】図 5 は、反磁場の振る舞いを説明するための図である。同図 (a)、(b) は、例えば形状が四角柱の磁気光学結晶 10 の内部に発生する磁化 50 と反磁場 51-1、51-2 の様子を示す。同図 (a) に示されているのは、反磁場 51-1 が磁気光学結晶 10 の側面に平行に発生している場合である。これは、電磁石及

び永久磁石によって印加される磁場が磁気光学結晶 10 の側面に平行であった場合に生じる。一方、同図 (b) は、電磁石及び永久磁石によって印加される磁場が、例えば磁気光学結晶 10 の対角線の方角を向いていた場合を示しており、反磁場 51-2 も磁気光学結晶 10 の対角線方向に生じている。

【0057】この場合、同図 (a) の場合に生じる反磁場 51-1 の方が同図 (b) の場合に生じる反磁場 51-2 よりも強いものとなる。本発明においては、磁化 50 は常に飽和した状態で使用し、磁化 50 の方向を変えることによりファラデー回転角を制御している。ところが、磁化 50 の方向と逆方向に生じる反磁場 51-1、51-2 の強さが方向により変化すると、磁気光学結晶 10 に印加されている磁場がやや不均一になってしまう。従って、ファラデー回転角に若干の悪影響を与えてしまう。

【0058】一方、同図 (c)、(d) は、磁気光学結晶 10 の形状を球形とした場合の反磁場 51-3、51-4 の様子を示すものである。球形をした磁気光学結晶 40 の場合には、形状が方向依存性を有しないために、同図 (c) の場合の反磁場 51-3 の強さと同図 (d) の場合の反磁場 51-4 の強さとは違いがない。従って、磁気光学結晶 40 に磁場を加える方向を変化させたとしても、反磁場 51-3、51-4 の強さに変化が生じないので印加磁場を均一に印加することができる。従って、ファラデー回転角の制御をより容易に行うことが可能となる。

【0059】このように図 4 の実施例によれば、ファラデー回転子を大型化することなく磁気光学結晶に印加される磁場をより一層均一にすることができる。ただし、図示されていないが、磁気光学結晶 40 の形状を球形としたことにより、磁気光学結晶自体が光に対しレンズとして働くようになる。従って、球形の磁気光学結晶 40 を用いたファラデー回転子を光学機器に組み込む場合には、このことを予め考慮したシステム設計が必要である。

【0060】図 6 は、本発明のファラデー回転子の光学装置への応用例として、光スイッチ、光アッテネータ、光変調器、偏光制御器を説明するための図である。同図 (a) には、光スイッチ、光アッテネータ、光変調器のそれぞれに共通の構成を示している。

【0061】光スイッチを構成する場合には、例えば、偏光子 61 と 62 を互いに 45° 傾け、ファラデー回転子 60 は光の偏光面を $+45^\circ$ と -45° との間で切り換えるように構成する。ここで説明の便宜上、光は偏光子 61 の側から入射するものとし、光の入射方向からみて時計回りに計った角度を正の角度とする。また、光の通り道は光路 57 で示されている。

【0062】偏光子 61 を通過してきた光は特定の偏光面を持った直線偏光となっている。この光がファラデー

13

回転子60に入射すると偏光面が $+45^\circ$ あるいは -45° 回転させられる。偏光子62が、偏光子61を通過した光の偏光面を $+45^\circ$ 回転させた光を通過させるように設置されていたとする。このときは、光がファラデー回転子60で $+45^\circ$ のファラデー回転角を与えられ、偏光子62を通過できるが、 -45° のファラデー回転角を与えられた場合には偏光子62を通過できない。このように、光に与えるファラデー回転角を離散的な所定の値になるように設定することで、光出力のオン／オフを行う光スイッチを構成することができる。

【0063】あるいは、偏光子62を偏光分離器等に置き換えることにより、ファラデー回転角が $+45^\circ$ の場合は光を直進させ、 -45° のときには光の進行方向を曲げるようにすることもでき、このようにすることによって、光出力の切替えではなく、光路の切替えを行う光スイッチを構成することもできる。

【0064】また、ファラデー回転子60によるファラデー回転角を $-\theta \sim +\theta$ （ここで、 θ は任意に設定される角度の値である）まで連続に変化させるようにすると、偏光子62から得られる光出力はファラデー回転子によって与えられたファラデー回転角に応じて連続に変化する。例えば、偏光子61と62が上記光スイッチの場合と同じ関係に設定されていた場合は、ファラデー回転角を $+45^\circ$ から -45° まで連続的に変化させることによって、光出力を次第に減衰させて全く光出力がない状態にまですることができ、光アッテネータを構成することができる。

【0065】また、ファラデー回転子60によるファラデー回転角の制御を、専用の制御装置（不図示）を設けるなどして連続的にしかも時間的に変化させるようにする。このようにすると、偏光子62から得られる光出力は時間的に強度を変化させる信号のようになるので、同図(a)に示される構成で光変調器を構成することができる。

【0066】同図(b)は偏光制御器の構成図の一例である。この偏光制御器は、ファラデー回転子60と偏光子61の他に、ファラデー回転子60から出力される光を分割するカプラ63、P偏光とS偏光とを分離する偏光分離器64、S偏光とP偏光それぞれを検出する光ディテクタ65、66、及び光ディテクタ65、66の検出結果に基づいてファラデー回転子60のファラデー回転角を制御する制御回路67とからなる。これらの素子は、カプラ63、偏光分離器64、光ディテクタ65、66よりなる偏光モニタ部58とファラデー回転子60、偏光子61、制御回路67よりなる偏光制御部59とに分けられる。

【0067】偏光子61側から入射した光信号69は、先ず偏光制御部の偏光子61によって直線偏光にされ、同じく偏光制御部のファラデー回転子60に入射する。ファラデー回転子60では、光信号69の偏光面を所定

14

の角度回転させ、偏光状態を変化させる。

【0068】偏光モニタ部のカプラ63では、ファラデー回転子60から出力された光信号69の偏光状態を変えることなく2つの光線に分離する。分離された光信号の一方は、偏光分離器64に入射され、S偏光とP偏光とに分離される。光ディテクタ65はS偏光の光の強度を、光ディテクタ66はP偏光の光強度を検出する。ファラデー回転子60から出力された光信号69を互いに直交するS偏光成分とP偏光成分とに分けて、その光強度を検出することによりファラデー回転子60から出力される光信号69の偏光状態を検出している。

【0069】光ディテクタ65と66が検出したそれぞれの偏光の光強度は検出信号として偏光制御部の制御回路67に送られる。制御回路67では、S偏光の光強度とP偏光の光強度とをもとにファラデー回転子60から出力されている光信号69の偏光状態を算出し、所望の偏光状態にするために必要とされる電磁石への電流供給量を計算して、制御信号68としてファラデー回転子60に与える。

【0070】ファラデー回転子60では、制御信号68に従って電磁石へ電流が供給され、ファラデー回転角が制御される。このようにして、同図(b)の構成によって、所望の偏光状態を有する光信号69を得ることができる。

【0071】以上のように、素子サイズを小さく抑えたままで磁気光学結晶に均一な磁場を印加可能な本発明のファラデー回転子を用いて上述のような各種光学装置を構成すれば、装置全体の小型化と高精度化とを同時に実現することができる。

【0072】

【発明の効果】本発明によれば、光が透過する磁気光学結晶に均一な磁場を印加でき、小型で実装が容易な可変回転角ファラデー回転子が可能になる。

【0073】光路に平行もしくは交差する方向の磁場を均一にするために高価な電磁石を複数用いることはせず、安価で小型の永久磁石を用いるようにし、永久磁石本体や電磁石の磁芯が光路を遮らないように設けるので、これらを特別な形状に加工する必要もなく、低コストでファラデー回転子を製造することができる。

【0074】更に、磁気光学結晶を球状とすることにより、磁場を印加することによって生じる反磁場の方向依存性をなくすることができる。従って、印加磁場の方向が変わっても反磁場は強度を変化させないので、より均一な磁場の印加を行うことができ、ファラデー回転角の制御を容易にすることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明のファラデー回転子の一実施例の構成及び磁気光学結晶に印加される磁場の様子を示す図である。

【図2】磁気光学結晶に印加される磁場と磁化の関係を

15

示す図である。

【図3】図1の実施例の一変形例及び印加磁場と磁化の関係を示す図である。

【図4】本発明の他の実施例を示す図である。

【図5】磁気光学結晶内部に生じる反磁場の影響を説明する図である。

【図6】本発明の応用例を示す図である。

【図7】従来のファラデー回転子の構成図である。

【図8】磁化の回転とこれによるファラデー回転角の影響を説明するための図である。

【図9】従来のファラデー回転子の問題点を説明する図である。

【符号の説明】

10、40、70 磁気光学結晶

11、12、71 永久磁石

13、72 電磁石

14、21、57、76 光路

15、73、73' 磁芯

16、74 コイル

17、75 電源

18、19、22 印加磁場

23、50 磁化

51-1、51-2、51-3、51-4 反磁場

58 偏光モニタ部

59 偏光制御部

60 ファラデー回転子

61、62 偏光子

63 カプラ

10 64 偏光分離器 64

65、66 光ディテクタ

67 制御回路

68 制御信号

69 光信号

77 光通過溝

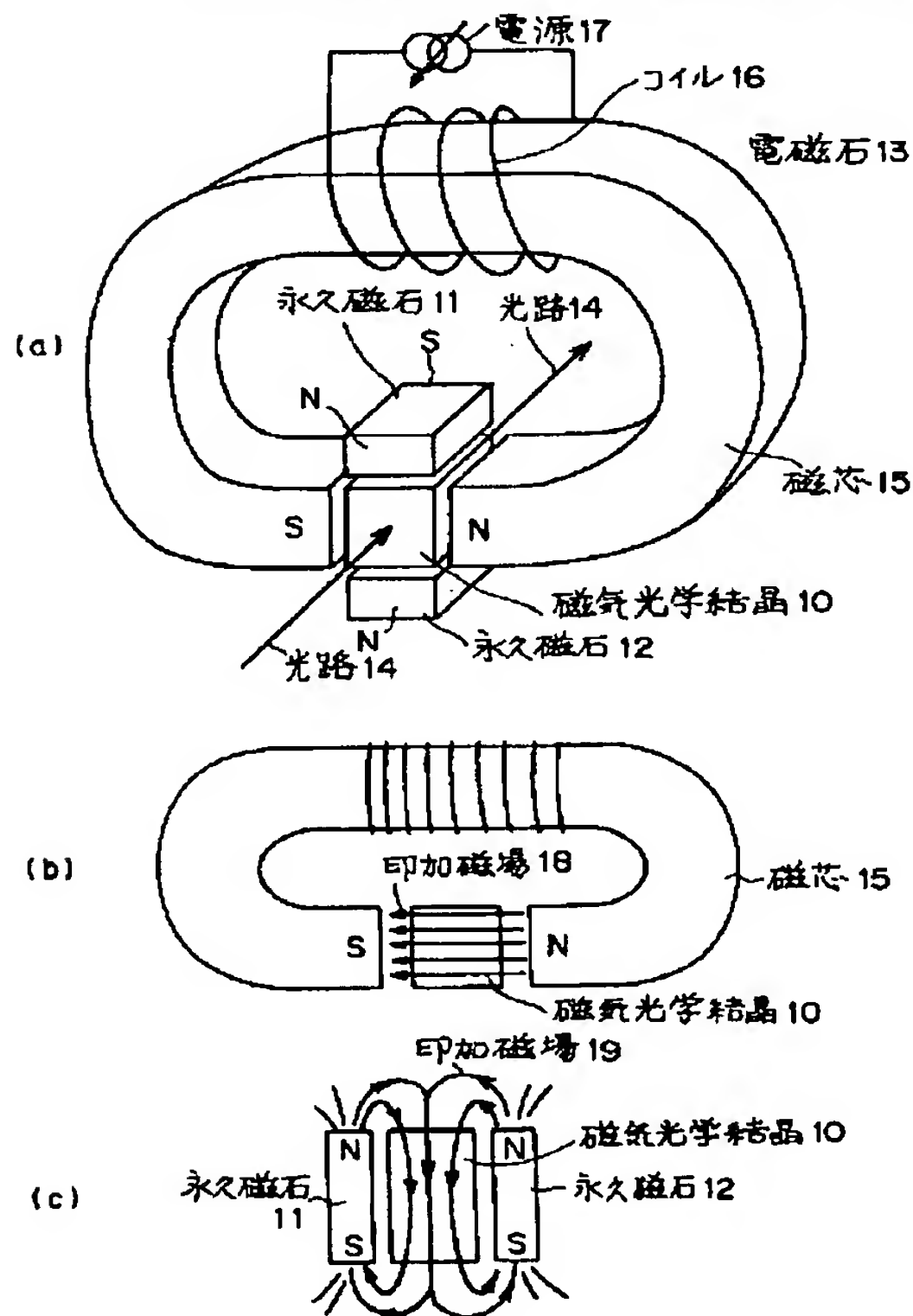
80 磁壁

81 磁区

90、91 磁場

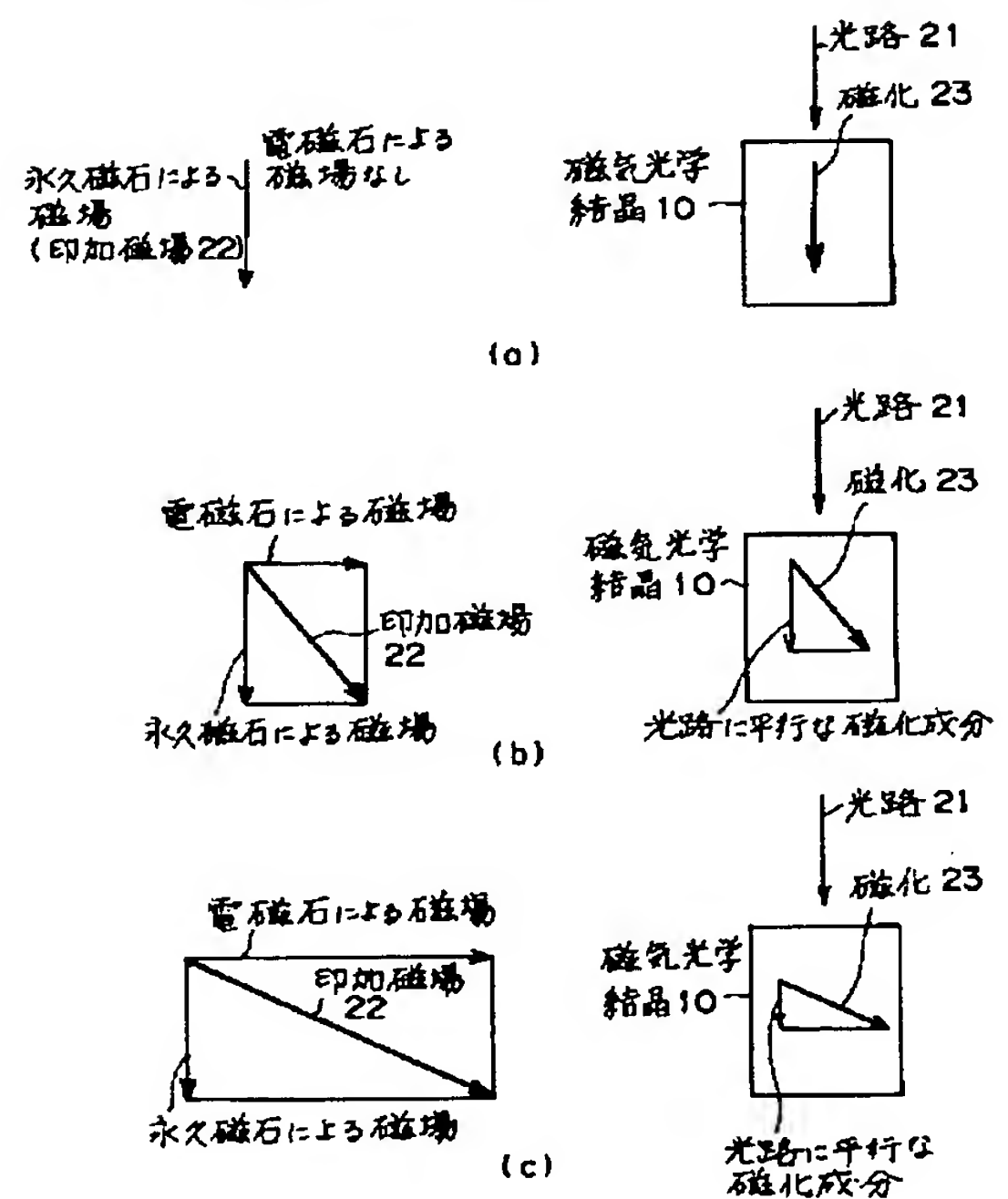
【図1】

本発明のファラデー回転子の一実施例の構成及び磁気光学結晶に印加される磁場の様子を示す図



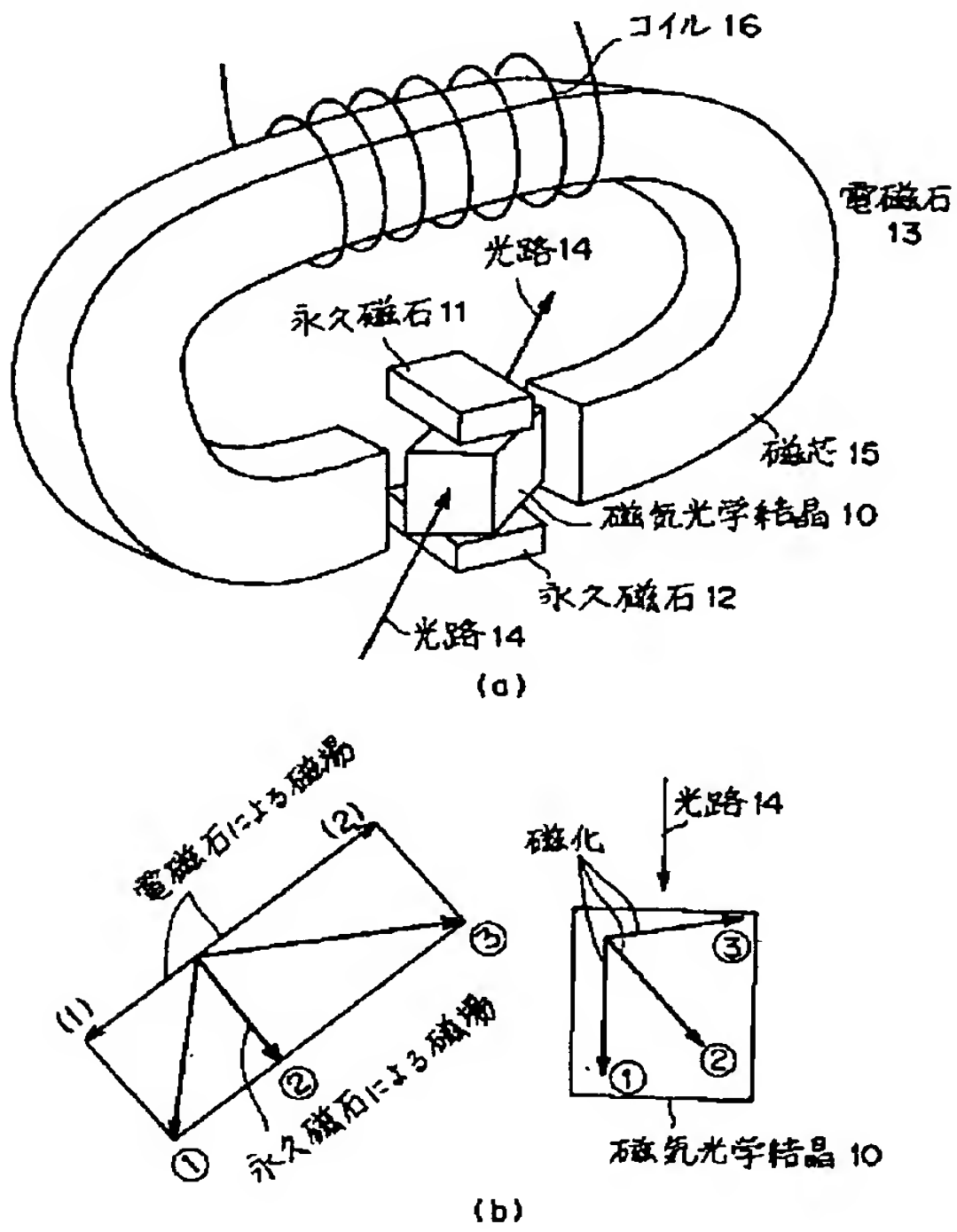
【図2】

磁気光学結晶に印加される磁場と磁化の関係を示す図



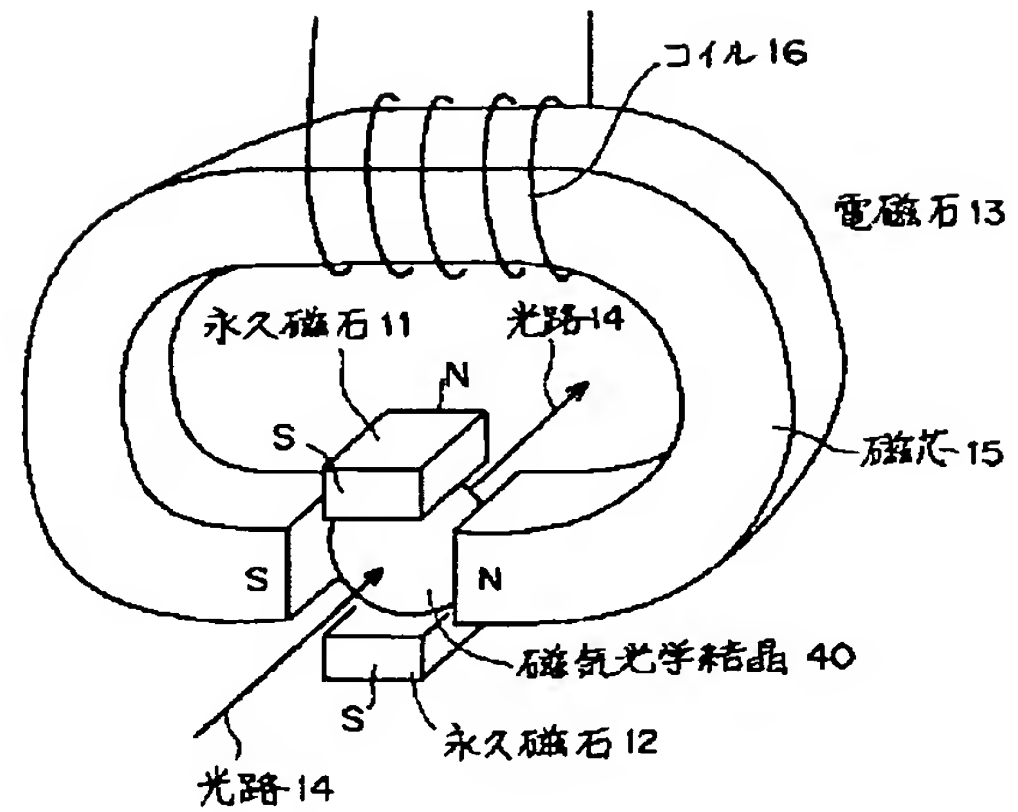
【図3】

図1の実施例の一変形例及び印加磁場と磁化の関係を示す図



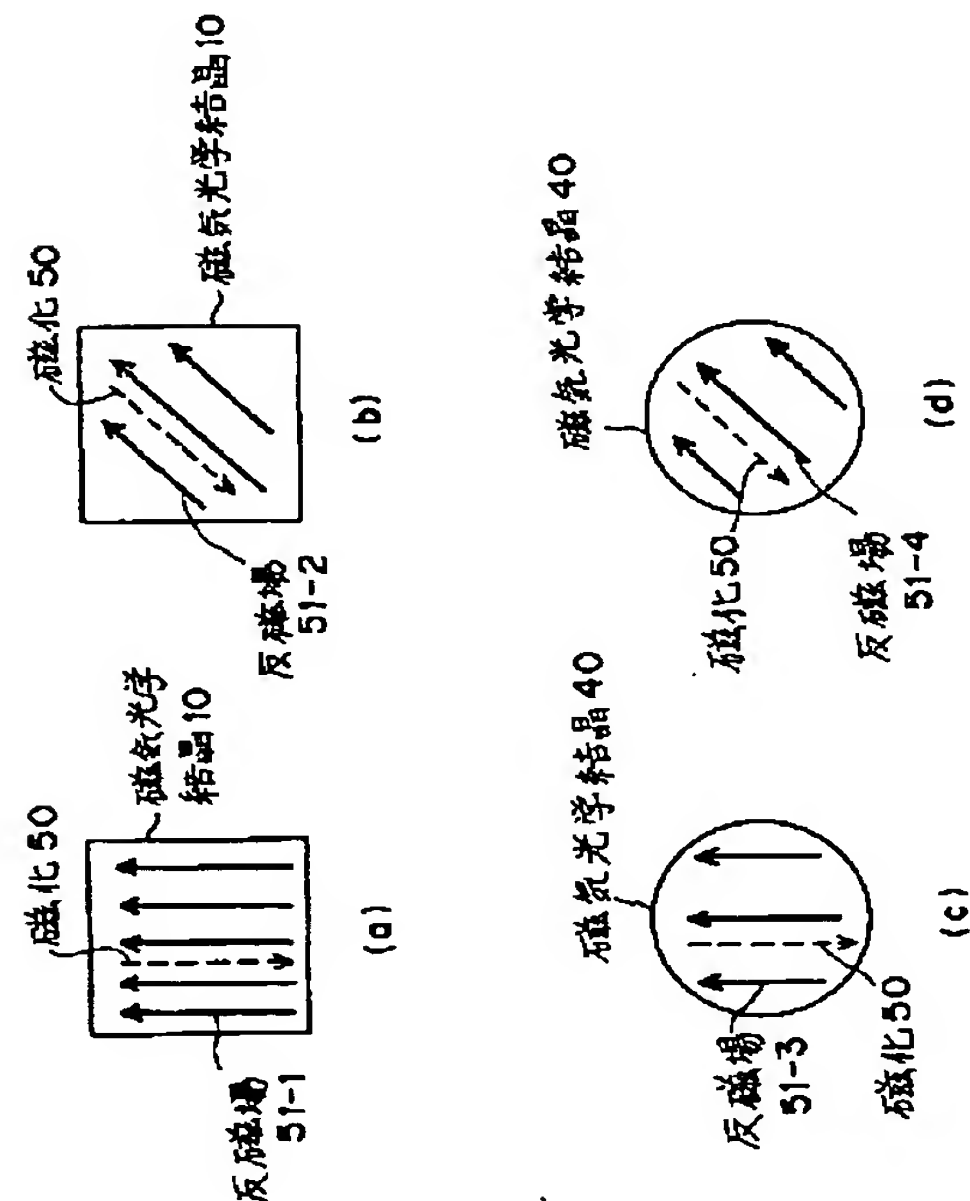
【図4】

本発明の他の実施例を示す図



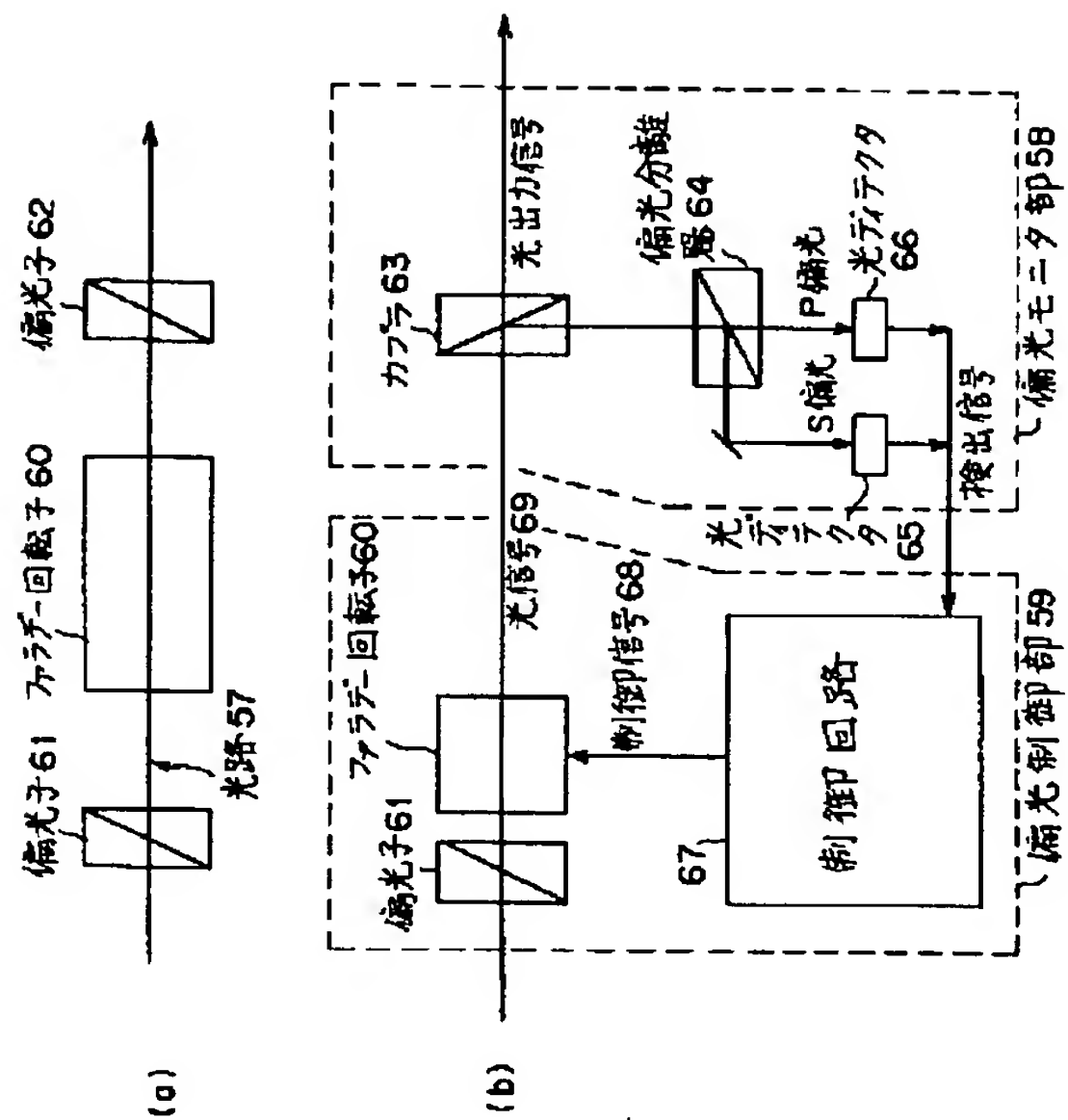
【図5】

磁気光学結晶内部に生じる反磁場の影響を説明する図



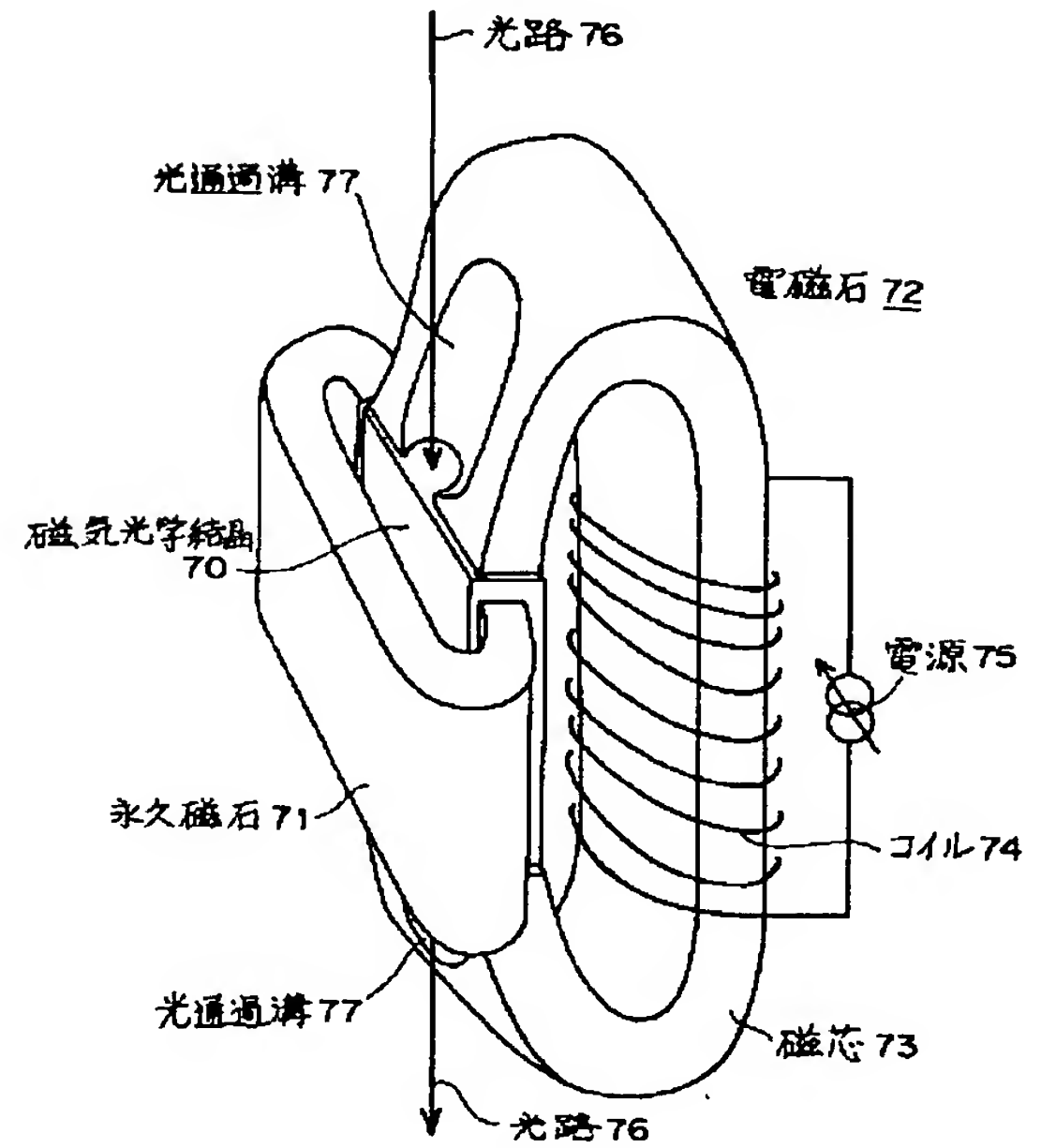
【図6】

本発明の応用例を示す図



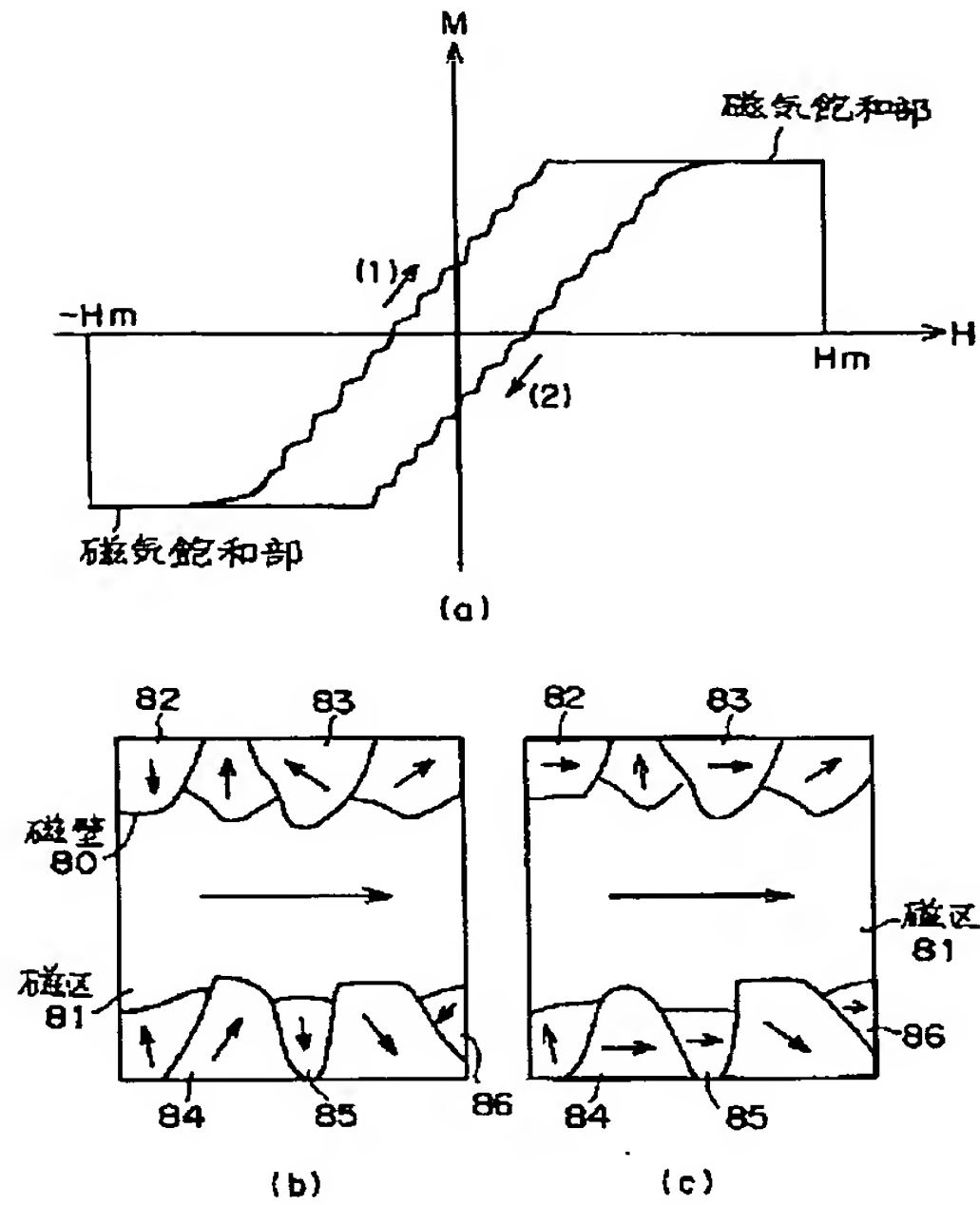
【図7】

従来のファラデー回転子の構成図



【図8】

磁化の回転とこれによる
ファラデー回転角の影響を説明するための図



【図9】

従来のファラデー回転子の問題点を説明する図

